



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ**  
**ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE**

**FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND  
COMMUNICATION**  
**DEPARTMENT OF ELECTROTECHNOLOGY**

## **MODULÁRNÍ INTERAKTIVNÍ SIMULACE MATERIÁLOVÝCH VELIČIN**

**MODULAR INTERACTIVE SIMULATIONS OF MATERIAL QUANTITIES**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**BACHELOR'S THESIS**

**AUTOR PRÁCE**  
**AUTHOR**

**Jiří Raška**

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
**SUPERVISOR**

**Ing. Martin Frk, Ph.D.**

**BRNO 2013**



## Abstrakt:

Tato práce se zabývá vybranými jevy, probíhajícími v elektrotechnických materiálech a fyzikálními zákonitostmi, jež tyto jevy popisují. Součástí práce je přehledné programové prostředí, vytvořené pomocí programovacího jazyka C++, které má sloužit pro studium těchto jevů a grafickou simulaci fyzikálních závislostí těchto materiálů.

## Abstract:

This work focus on the chosen effects, which go on in electrotechnical materials and physical laws which are described by those effects. Part of this work is well arranged development environment, made by using programming language C++, which might be used for studying and illustrative graphical displaying of physical laws of those materials.

## Klíčová slova:

Komplexní permitivita, teplotní roztažnost, teplotní závislost rezistivity, termoelektrické napětí, simulace.

## Keywords:

Complex permittivity, thermal expansivity, thermal dependence of electrical resistance, thermoelectric voltage, simulation.

## Bibliografická citace díla:

RAŠKA, J. *Modulární interaktivní simulace materiálových veličin*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 42 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Frk, Ph.D..

## Prohlášení autora o původnosti díla:

Prohlašuji, že jsem tuto vysokoškolskou kvalifikační práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce, s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení.

V Brně dne 6.6.2013

.....

## Poděkování:

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Martinu Frkovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování bakalářské práce.

# Obsah

Seznam obrázků.....	6
Seznam použitých symbolů.....	7
Úvod.....	9
<b>1 Teoretická část.....</b>	<b>10</b>
1.1 Komplexní permitivita.....	10
1.1.1 Polarizace dielektrika ve stejnosměrném elektrickém poli.....	10
1.1.2 Polarizační mechanismy.....	11
1.1.3 Polarizace dielektrika ve střídavém elektrickém poli.....	13
1.2 Teplotní roztažnost tuhých látek.....	14
1.3 Teplotní závislost rezistivity.....	16
1.3.1 Přenos náboje.....	16
1.3.2 Elektronová vodivost.....	17
1.3.3 Střední volná dráha.....	18
1.3.4 Závislost rezistivity na teplotě.....	18
1.4 Termoelektrický článek.....	19
1.4.1 Termoelektrické jevy.....	19
1.4.2 Termoemise (termoelektronová emise).....	20
1.4.3 Kontaktní potenciál.....	20
1.4.4 Seebeckův jev.....	22
1.4.5 Typy termočlánků.....	24
<b>2 Praktická část.....</b>	<b>25</b>
2.1 Programové prostředí.....	25
2.1.1 Programovací jazyk C++.....	25
2.1.2 Programovací prostředí Microsoft Visual Studio 2008.....	25
2.2 Popis jednotlivých částí programu.....	25
2.2.1 Záložka - Úvod.....	26
2.2.2 Záložka - Komplexní permitivita.....	27
2.2.3 Záložka - Teplotní roztažnost.....	29
2.2.4 Záložka - Teplotní závislost rezistivity.....	31
2.2.5 Záložka - Termoelektrické napětí.....	33
2.2.6 Záložky s teoretickým úvodem.....	35
2.2.7 Záložka - Konstanty.....	35
2.3 Popis vytváření modulů.....	37
2.3.1 Rozmístění komponentů.....	37
2.3.2 Vytvoření funkcí pro zjištění hodnot komponentů.....	37
2.3.3 Modifikace hlavních funkcí.....	38
<b>3 Závěr.....</b>	<b>41</b>
<b>4 Použitá literatura.....</b>	<b>42</b>

## Seznam obrázků

Obr. 1: Pásový model na rozhraní dvou kovů [5].....	21
Obr. 2: Rozhraní dvou kovů bez rozdílu teplot na kontaktních ploškách [7].....	22
Obr. 3: Termočlánek s rozdílem teplot na dvou kontaktních ploškách dvou kovů [7].	23
Obr. 4: Záložka - Úvod.....	26
Obr. 5: Záložka - Komplexní permitivita, závislost permitivity na frekvenci elektrického pole.....	28
Obr. 6: Příklad výpisu 9 hodnot pro relativní permitivitu.....	29
Obr. 7: Záložka - Teplotní roztažnost.....	31
Obr. 8: Záložka - Teplotní závislost rezistivity.....	32
Obr. 9: Záložka - Termoelektrické napětí.....	34
Obr. 10: Příklad záložky s teoretickým úvodem do problematiky komplexní permitivity .....	35
Obr. 11: Záložka - Konstanty, podzáložka teplotní závislost rezistivity.....	36

## Seznam použitých symbolů

$A$	(V.K <sup>-1</sup> )	konstanta termočlánku
$C, C_0$	(F)	kapacita, geometrická kapacita
$n$	(m <sup>-3</sup> )	koncentrace částic
$n$	(m <sup>-3</sup> )	koncentrace nosičů náboje
$e$	(C)	náboj elektronu (1,602.10 <sup>-19</sup> )
$E, E_l$	(V.m <sup>-1</sup> )	intenzita elektrického pole, intenzita lokálního elektrického pole
$k$	(J.K <sup>-1</sup> )	Boltzmannova konstanta (1,38.10 <sup>-23</sup> )
$l, l_0$	(m)	délka, počáteční délka
$P$	(C.m <sup>-2</sup> )	polarizace
$q$	(C)	náboj nosičů náboje
$Q, Q_0$	(C)	elektrický náboj s dielektrikem, bez dielektrika
$tg \delta$	(-)	ztrátový činitel
$U_{12}$	(V)	dotekový rozdíl potenciálů stykového místa
$U_t$	(V)	termoelektrické napětí
$V, V_0$	(m <sup>3</sup> )	objem, počáteční objem
$W_F$	(eV)	Fermiho energie
$W_V$	(eV)	výstupní práce elektronu
$W_0$	(eV)	energetická hladina vakua
$\alpha$	(K <sup>-1</sup> )	součinitel délkové roztažnosti
$\alpha$	(K <sup>-1</sup> )	součinitel elektrického odporu
$\alpha_p$	(F.m <sup>2</sup> )	polarizovatelnost částic
$\beta$	(K <sup>-1</sup> )	součinitel objemové roztažnosti
$\chi$	(-)	dielektrická susceptibilita
$\delta$	(rad)	ztrátový úhel
$\Delta l$	(m)	změna délky

$\Delta T$	(K)	změna teploty
$\varepsilon_s, \varepsilon_\infty$	(-)	statická relativní permitivita, optická relativní permitivita
$\varepsilon_r$	(-)	relativní permitivita
$\varepsilon^*$	(-)	komplexní permitivita
$\varepsilon'$	(-)	relativní permitivita (reálná část komplexní permitivity)
$\varepsilon''$	(-)	ztrátové číslo (imaginární část komplexní permitivity)
$\mu$	(m <sup>2</sup> .V <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup> )	pohyblivost nosičů náboje
$\mu_i$	(C.m)	indukovaný dipólový moment
$\bar{v}$	(m.s <sup>-1</sup> )	driftová rychlost nosičů náboje
$\omega$	(rad.s <sup>-1</sup> )	kruhová frekvence
$\rho, \rho_0$	(Ω.m)	rezistivita, počáteční rezistivita
$\sigma$	(S.m <sup>-1</sup> )	konduktivita
$\tau$	(s)	relaxační doba
$\varphi$	(V)	kontaktní potenciál
$\vartheta_M, \vartheta_S$	(°C)	teplota měřeného prostoru, stabilizovaná teplota



## Úvod

Práce je zaměřena na účinky střídavého elektrického pole na komplexní permitivitu dielektrických materiálů, vliv teploty na délkovou roztažnost pevných látek, závislost rezistivity na teplotě materiálu a vznik termoelektrického napětí na kontaktních ploškách dvou různých kovů. Součástí práce je vytvoření programu ve vývojovém prostředí Microsoft Visual Studio 2008, který slouží uživateli pro pochopení a simulaci těchto fyzikálních závislostí.

V teoretické části se práce zaměřuje na chování dielektrických materiálů v elektrickém poli. Rozebírá polarizaci dielektrika v stejnosměrném a střídavém elektrickém poli a studuje polarizační mechanismy, které v dielektriku fungují. Blíže zkoumá účinky střídavého elektrického pole na komplexní permitivitu dielektrických materiálů. V další části je popsána spojitost mezi růstem teploty tělesa a zvětšováním rozměrů tělesa, v důsledku zvětšování amplitudy tepelných kmitů atomů krystalové mřížky. Teoretická část se dále zabývá závislostí rezistivity kovů na teplotě a zabývá se vlivem tepelných kmitů krystalové mřížky kovů na střední volnou dráhu nosičů náboje. V teoretické části jsou také popsány termoelektrické jevy, odehrávající se na rozhraní dvou látek a podrobněji je zkoumán kontaktní potenciál dvou různých kovů. Teoretické poznatky jsou poté použity v praktické části.

Praktická část se zabývá vytvořením programu, který souží pro studium a simulaci materiálových veličin elektrotechnických materiálů. Program je členěn do modulů, oddělujících jednotlivé teoretické okruhy. Program graficky znázorňuje průběhy relativní permitivity  $\epsilon'$ , ztrátového čísla  $\epsilon''$  a ztrátového činitele  $\operatorname{tg} \delta$ , v závislosti na frekvenci střídavého elektrického pole, průběh přírůstku délky  $\Delta l$ , v závislosti na teplotě tělesa, průběh rezistivity  $\rho$  vybraných materiálů, v závislosti na jejich teplotě a průběh termoelektrického napětí  $U_t$  termočlánku, v závislosti na teplotě. Program srozumitelně zobrazuje teoretický úvod ke všem okruhům. V programu je vytvořena databáze vybraných materiálových konstant.

# 1 Teoretická část

## 1.1 Komplexní permitivita

### 1.1.1 Polarizace dielektrika ve stejnosměrném elektrickém poli

Pohyb vázaných elektrických nábojů vlivem vnějšího elektrického pole charakterizuje polarizaci dielektrika. Vychýlením nábojů z rovnovážných poloh vznikají indukované dipólové momenty. Působením vnějšího elektrického pole se v látkách obsahujících dipólové molekuly natáčejí tyto molekuly ve směru působení elektrického pole. Velikost indukovaných dipólových momentů  $\vec{\mu}_i$ , je vyjádřena vztahem

$$\vec{\mu}_i = \alpha_p \vec{E}_l, \quad (1)$$

kde  $E_l$  značí intenzitu lokálního (vnitřního) elektrického pole látky a  $\alpha_p$  je polarizovatelnost částic látky. Intenzita elektrického pole, působícího bezprostředně na polarizovatelnou částici, je dána součtem intenzity makroskopického elektrického pole a silových účinků nábojů blízkých molekul v okolí. Objemová hustota dipólového momentu je vyjádřena pomocí vektoru dielektrické polarizace. Vektor dielektrické polarizace  $\vec{P}$  vztažený na jednotkový objem dielektrika lze vyjádřit Clausiovou rovnicí

$$\vec{P} = \frac{\sum \vec{\mu}_i}{V} = n \alpha_p \vec{E}_l, \quad (2)$$

kde  $n$  je koncentrace polarizovaných částic v jednotkovém objemu [3].

Ve stejnosměrném elektrickém poli je hodnota statické relativní permitivity pro vakuum rovna  $\epsilon_s = 1$ , v dielektriku je vždy  $\epsilon_s > 1$ . Relativní permitivita  $\epsilon_r$  je určena poměrem kapacity kondenzátoru s daným dielektrikem a kapacity stejného kondenzátoru za stejných podmínek bez dielektrika (vakuum)

$$\epsilon_r = \frac{C}{C_0} = \frac{Q}{Q_0}, \quad (3)$$

kde  $C$  je kapacita kondenzátoru s dielektrikem,  $C_0$  je geometrická kapacita identického vakuového kondenzátoru,  $Q$  je celkový náboj kondenzátoru s dielektrikem a  $Q_0$  je celkový náboj vakuového kondenzátoru. Dielektrická susceptibilita je bezrozměrná veličina a je definována vztahem

$$\chi = \varepsilon_s - 1 = \frac{\text{plošná hustota vázaného náboje}}{\text{plošná hustota volného náboje}} \quad (4)$$

Ve vakuu má hodnotu  $\chi=0$ , zatímco v dielektriku nabývá hodnoty od nepatrně větších než nula až do tisíců. Podle velikosti  $\chi$  rozdělujeme dielektrika na paraelektrika (hodnoty nepatrně větší než nula až k okolo  $10^2$ ) a feroelektrika (hodnoty od  $10^2$  až do  $10^4$ ) [3].

### 1.1.2 Polarizační mechanismy

V dielektrotechnických materiálech se vyskytuje několik polarizačních mechanismů, rozlišujících se podle stavu a chování dielektrika. V těchto materiálech se často objevuje několik druhů polarizací současně, přičemž silnější mechanismy zastíní slabší.

#### Elastické polarizace (rychlé)

Vázané elektrické náboje (elektrony, ionty) jsou vázány pružnými elektrostatickými silami do rovnovážných poloh. Jejich vychýlení působením vnějšího elektrického pole a navrácení do původní rovnovážné polohy po zániku elektrického pole v materiálu je v porovnání s ostatními druhy polarizací velmi rychlé, prakticky okamžité, což mimo jiné dokazuje, že tyto polarizace nejsou spojeny s dielektrickými ztrátami.

**Elektronová polarizace-** Elektronová polarizace představuje pružné vychýlení elektronů elektronového obalu atomů, molekul a iontů z jejich rovnovážných poloh. V této poloze musí platit, že síla vnějšího elektrického pole a síla, kterou je částice přitahována (vázána) do své rovnovážné polohy, jsou stejně velké a opačně orientované. Převážná část celkového indukovaného momentu vzniká vychýlením elektronů vnějšího elektronového obalu, které jsou nejslaběji vázány. Při elektronové polarizaci jde o vzájemný pohyb elektronů elektronového obalu a jádra. Vzdálenost, o kterou se části atomu posunou, je nepřímo úměrná jejich hmotnosti. Jádro se posune jen několik desetin celkové dráhy, takže lze brát elektronovou polarizaci jako pohyb vázaných elektronů elektronového obalu. Doba ustálení elektronové polarizace je velmi krátká (přibližně  $10^{-15}$  s), proto se tato polarizace vyskytuje v celém frekvenčním rozsahu. Nedochozí u ní k dielektrickým ztrátám a vyskytuje se ve všech izolačních i polovodičových materiálech.

**Iontová polarizace-** Iontová polarizace je pohyb pružně vázaných iontů, které jsou součástí především iontových krystalů a všech izolantů, kde se vyskytuje iontová vazba. Doba ustálení je  $10^{-13}$  s, a proto tato polarizace není spojena s dielektrickými ztrátami v celém rozsahu technicky používaných frekvencí.

### **Relaxační polarizace (pomalé)**

Relaxační polarizace se vyznačují delší dobou ustálení polarizace. Při působení vnějšího elektrického pole dipólové molekuly nebo ionty překonávají tepelné pohyby a natáčejí se ve směru elektrického pole. Relaxační doba  $\tau$  je důležitou časovou konstantou tohoto děje charakterizující polarizaci. Po zániku vnějšího elektrického pole tepelný pohyb postupně přivede soustavu vázaných nábojů do rovnovážných poloh. Protože tepelný pohyb má v těchto polarizacích důležitou úlohu, nazývají se často i jako tepelné polarizace.

**Dipólová polarizace-** Dipólová polarizace je spojena s tepelným pohybem molekul. Dipólové molekuly překonávají účinkem vnějšího elektrického pole chaotické tepelné pohyby a částečně se orientují. Podmínkou této polarizace je pohyblivost dipólových molekul. Molekulové síly nebrání dipólům v orientaci ve směru elektrického pole. Se vzrůstající teplotou molekulové síly slábnou a zesiluje se tím dipólová polarizace, současně ale roste energie tepelného pohybu molekul, která zmenšuje vliv vnějšího elektrického pole. Prostředí klade odpor orientaci molekul, a proto je dipólová polarizace spojena s dielektrickými ztrátami.

**Iontová relaxační polarizace-** Iontová relaxační polarizace se vyskytuje v anorganických amorfních látkách a v některých iontových krystalických anorganických látkách. Anorganická skla obsahují síťovinu, která byla vytvořena sklotvornými oxidy, v těchto dutinkách jsou uzavřeny ionty. Pohyb většiny iontů je tudíž omezený a proto se navenek jeví jako pohyb vázaných nábojů. Po odeznění účinků vnějšího elektrického pole se ionty nahromaděné na stěnách dutin postupně rozptýlí vlivem tepelného pohybu.

### **Zvláštní polarizace**

**Mezivrstvová (migrační) polarizace-** Mezivrstvová polarizace se vyskytuje pouze v nehomogenních dielektrikách, které se skládají minimálně ze dvou materiálů s rozdílnou vodivostí a relativní permitivitou. Pokud na tento materiál působí vnější elektrické pole, dochází na rozhraních dvou prostředí s různou pohyblivostí volných nábojů k jejich hromadění, čímž se stávají vázanými. Navenek tento děj připomíná polarizaci.

**Spontánní polarizace-** Spontánní polarizace se může projevit pouze v materiálech, ve kterých se vyskytují domény, tj. oblasti nesymetrického rozložení i bez působení pole. Domény mají různou orientaci, takže navenek je materiál neutrální. Působením vnějšího elektrického pole dochází k orientaci domén ve směru elektrického pole, a tudíž k velmi silné polarizaci. Při určité velikosti vnějšího elektrického pole dochází k nasycení a další zvyšování tohoto pole nemá vliv na nárůst polarizace. Spontánní polarizace je spojena s velkými dielektrickými ztrátami.

**Rezonanční polarizace-** Rezonanční polarizace je závislá na fyzikálně-chemických zvláštěnostech materiálů. Vyskytuje se při frekvencích viditelného světla vlivem rezonance vlastních tepelných kmitů některých částic, elektronů nebo iontů, s kmity vnějšího elektrického pole. V materiálech se mohou za určitých podmínek vyskytovat tzv. defektní elektrony, které posouvají tuto polarizaci k nižším frekvencím.

**Permanentní polarizace-** Permanentní polarizace se vyskytuje u látek, které se označují elektrety (permanentně zpolarizovaná tělesa). Nejznámější způsob výroby těchto materiálů je zahřátí látky na teplotu tání a následné ochlazení látky v silném elektrickém poli [3].

### 1.1.3 Polarizace dielektrika ve střídavém elektrickém poli

Vliv střídavého elektrického pole na dielektrické materiály lze popsat pomocí komplexní permitivity. Komplexní permitivita je fyzikální veličina vyjadřující vliv střídavého elektrického pole na indukci elektrického pole v dielektriku. Základní definiční vztah pro komplexní permitivitu je

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon'' ; \quad (5)$$

reálná složka zde představuje relativní permitivitu a imaginární část představuje ztrátové číslo. Empirické funkce, popisující komplexní permitivitu v kmitočtové oblasti, je nutno rozložit na reálnou a imaginární část a tím separovat relativní permitivitu  $\varepsilon'$  a ztrátové číslo  $\varepsilon''$ , ztrátový činitel  $\tan \delta$  je poté dán podílem  $\varepsilon''$  a  $\varepsilon'$ , tj.[3]

$$\varepsilon'' = \varepsilon' \tan \delta \Rightarrow \tan \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} . \quad (6)$$

#### Debyeovo rozdělení

Rovnice pro  $\varepsilon^*$ ,  $\varepsilon'$  a  $\varepsilon''$  se nazývají Debyeovými rovnicemi. Tyto rovnice předpokládají existenci jedné relaxační doby  $\tau$ . Komplexní permitivita pro toto rozdělení je dána vztahem

$$\varepsilon^* = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + j\omega\tau} , \quad (7)$$

kde  $\varepsilon_s$  je statická relativní permitivita (permitivita při  $\omega \rightarrow 0$ ) a  $\varepsilon_\infty$  je optická relativní permitivita (permitivita při  $\omega \rightarrow \infty$ ). Rovnici (7) lze rozložit na reálnou a imaginární část a získat tak rovnici

$$\varepsilon' = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}}{1 + \omega^2 \tau^2}, \quad (8)$$

pro relativní permitivitu, a rovnici

$$\varepsilon'' = \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}) \omega \tau}{1 + \omega^2 \tau^2}, \quad (9)$$

pro ztrátové číslo [3].

## 1.2 Teplotní roztažnost tuhých látek

Je všeobecně známo, že tuhá tělesa při ohřívání zvětšují svůj objem, přičemž tento jev se nazývá teplotní roztažnost tuhých látek. Objem krystalu roste se zvětšující se střední vzdáleností mezi jeho stavebními částmi. Z toho je možno usoudit, že zvyšováním teploty se zvětšuje vzájemná vzdálenost mezi atomy krystalu. Zvýšení teploty krystalu má za následek zvětšení energie molekulového pohybu, to znamená tepelných kmitů atomů mřížky, a vede také ke zvětšení amplitudy těchto kmitů. Zvětšení amplitudy kmitů atomů nemusí však vést ke zvětšení střední vzdálenosti mezi nimi. Kdyby kmity atomů byly přesně harmonické, potom o kolik víc se přiblíží atom k sousednímu atomu, o tolik víc by se vzdálil od druhého. To značí, že zvětšení amplitudy kmitů by v takovémto případě nevedlo k zvětšení střední vzdálenosti mezi atomy, a tedy ani k teplotní roztažnosti látek [4].

Atomy v krystalové mřížce ale nekonají ve skutečnosti harmonické kmity, ale kmity anharmonické. Příčinou toho je charakter závislosti sil vzájemného působení mezi atomy na jejich vzdálenosti. Tato závislost je taková, že při větších vzdálenostech mezi atomy mají síly vzájemného působení charakter přitažlivých sil, ale při zmenšování vzájemné vzdálenosti mezi atomy se mění znaménko těchto sil a získávají charakter odpudivých sil, které se zmenšováním vzdálenosti mezi atomy rychle rostou. To má za následek, že při vzrůstání amplitudy kmitání atomů, způsobené zvýšením teploty tělesa, převládá růst odpudivých sil nad růstem sil přitažlivých, což vede k lehčímu vzdalování atomů. To přirozeně vede k zvětšení střední vzdálenosti mezi atomy, a tedy k zvětšení objemu tělesa při zvyšování jeho teploty [4].

Makroskopicky pozorovaná teplotní roztažnost tuhých látek je charakterizována dvěma koeficienty, koeficientem lineární teplotní roztažnosti  $\alpha$  a koeficientem objemové teplotní roztažnosti  $\beta$ . Koeficient  $\alpha$  je definován vztahem

$$\alpha = \frac{1}{l_0} \frac{\Delta l}{\Delta T} , \quad (10)$$

a značí relativní změnu délky tyče při jednotkové změně teploty. Podobně je koeficient  $\beta$  definovaný vztahem

$$\beta = \frac{1}{V_0} \frac{\Delta V}{\Delta T} . \quad (11)$$

Vyjadřuje tedy relativní změnu objemu, způsobenou jednotkovou změnou teploty. Ze vztahů (10) a (11) je možno pro délku tyče  $l$ , respektive pro objem tělesa  $V$  při teplotě, která se od původní teploty, při které má tyč délku  $l_0$ , respektive těleso objem  $V_0$ , liší o  $\Delta T$ , psát

$$l = l_0 (1 + \alpha \Delta T) , \quad (12)$$

resp.

$$V = V_0 (1 + \beta \Delta T) . \quad (13)$$

Uvažujeme-li, že přírůstek délky tyče  $\Delta l$  lze zapsat jako

$$\Delta l = l - l_0 , \quad (14)$$

potom lze, pro přírůstek délky tyče ze závislostí (12) a (14), odvodit tento vzorec

$$\Delta l = l_0 \alpha \Delta T . \quad (15)$$

V důsledku anizotropie krystalů může mít součinitel lineární teplotní roztažnosti  $\alpha$  v různých směrech různou velikost. Kulové těleso vyrobené z takového krystalu po ohřátí ztratí kulovitý tvar. Takováto koule přejde ohřátím do tvaru trojosého elipsoidu, jehož osy připadají směřům krystalografických os krystalu. Součinitele teplotní roztažnosti ve směrech tří os tohoto elipsoidu se nazývají hlavními součiniteli teplotní roztažnosti krystalu. Když je označíme  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  a  $\alpha_3$ , potom pro součinitel objemové teplotní roztažnosti platí vztah

$$\beta = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 . \quad (16)$$

V kubických krystalech stejně jako v izotropních látkách  $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha$ , takže

$$\beta = 3\alpha . \quad (17)$$

Koule vyrobená z uvedených látek si zachová kulovitý tvar i při změně teploty. U některých krystalů, například hexagonálních je  $\alpha_1 = \alpha_2$ , takže

$$\beta = 2\alpha_1 + \alpha_3 . \quad (18)$$

Součinitele lineární i objemové teplotní roztažnosti jsou prakticky konstantní, když je teplotní interval, ve kterém je určujeme, poměrně malý. Všeobecně však tyto součinitele závisí na teplotě. Při nízkých teplotách součinitele  $\alpha$  i  $\beta$  klesají se třetí mocninou absolutní teploty a konvergují k nule při absolutní nulové teplotě, neboť teplotní roztažnost tuhých látek bezprostředně souvisí s tepelnými kmity mřížky a na amplitudě těchto kmitů závisí střední vzájemná vzdálenost mezi atomy [4].

**Tab. 1:** Součinitel délkové teplotní roztažnosti  $\alpha$  vybraných materiálů [4], [9].

<b>Materiál</b>	<b>Součinitel délkové teplotní roztažnosti <math>\alpha</math> [K<sup>-1</sup>]</b>
Hliník	23,8.10 <sup>-6</sup>
Stříbro	19,7.10 <sup>-6</sup>
Železo	12.10 <sup>-6</sup>
Měď	16,8.10 <sup>-6</sup>
Zlato	18,8.10 <sup>-6</sup>
Nikl	13,4.10 <sup>-6</sup>
Křemík	2,6.10 <sup>-6</sup>
Germanium	5,9.10 <sup>-6</sup>
GaAs	5,73.10 <sup>-6</sup>

## 1.3 Teplotní závislost rezistivity

### 1.3.1 Přenos náboje

Běžně jsou materiály rozdělovány do tří kategorií, na vodiče, polovodiče a izolanty. Tyto materiály mají široký rozsah konduktivit  $\sigma$ , respektive rezistivit  $\rho$  (podle vztahu (19)). Materiály s volnými elektrony, které se mohou pohybovat skrz strukturu, se řadí do kategorie vodičů. Izolanty zahrnují keramické a polymerické materiály se silně vázanými



elektrony a nedifundujícími ionty. Dlouhou dobu byly považovány za použitelné pouze tyto dva typy materiálů, nicméně dnes jsou polovodičové materiály také nesmírně důležité [12].

V těchto typech materiálů je náboj přenášen v násobcích hodnoty elementárního náboje, to znamená  $1,602 \cdot 10^{-19}$  C, což je náboj jednoho elektronu. Ve vodičích je to právě elektron, který je nosičem náboje. V izolantech může být náboj přenášen pomocí difundujících iontů. Jejich náboj je celočíselným násobkem náboje elektronu (- nebo +, respektive aniony a kationy). Tudíž například  $\text{SO}_4^{2-}$  ionty přenášejí  $2 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} = 3,204 \cdot 10^{-19}$  C náboje uvnitř baterie, a všechny  $\text{Pb}^{2+}$  ionty postrádají náboj dvou elektronů, takže se pohybují v opačném směru. Elektrony a ionty jsou záporně nabití nosiče náboje, kationy jako například  $\text{Pb}^{2+}$  jsou kladně nabití, jelikož postrádají elektrony. V polovodičích existují další kladně nabití nosiče náboje, jsou to elektronové díry. Elektronová díra je doplněk elektronu v jinak úplné dvojici elektron-elektronová díra [12].

Hodnoty konduktivity  $\sigma$  a rezistivity  $\rho$  pro materiály záleží na koncentraci  $n$  nosičů náboje, velikosti náboje  $q$  a jejich pohyblivosti  $\mu$  podle vztahu

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = n q \mu . \quad (19)$$

Driftová rychlost  $\bar{v}$  nosičů el. náboje lze vyjádřit vztahem

$$\bar{v} = \mu E . \quad (20)$$

Driftová rychlost je úměrná elektrickému poli  $E$ , při absenci elektrického pole je tedy driftová rychlost nulová. To znamená, že se nosiče náboje nepohybují určitým směrem, ale jejich pohyb je chaotický, a náboj nosiče je vyrovnán pohybem nosičů v opačném směru [12].

### 1.3.2 Elektronová vodivost

Valenční elektrony se mohou pohybovat v celém objemu kovu jako stojaté vlny. Tudíž zde nedochází k přenosu náboje mezi atomy mřížky za absence elektrického pole. Pokud je kov umístěn do elektrického obvodu, elektrony se pohybují směrem ke kladné elektrodě, nabudou více energie a získají rychlost v tomto směru. Naopak ty elektrony, které se pohybují k záporné elektrodě sníží svou energii a rychlost. Jako důsledek driftové rychlosti [12].

### 1.3.3 Střední volná dráha

Vlny se pohybují skrze periodickou strukturu bez přerušení. Dobře organizované krystaly (například v kovech) poskytují jednu z nejpravidelnějších struktur. Krystalová mřížka kovů poskytuje výborné prostředí pro pohyb elektronů. Nicméně, jakákoli nepravidelnost v opakující se struktuře, skrze kterou se vlny pohybují, může vlnu odrazit. Tudiž, když je pohybující se elektron směrem k pozitivní elektrodě odražen, již nebude získávat rychlost v tomto směru. Tento síťový efekt redukuje driftovou rychlost, i když se nezmění elektrické pole. Nepravidelnosti v krystalové mřížce tedy snižují pohyblivost elektronů, proto snižují vodivost a zvyšují rezistivitu materiálu. Průměrná vzdálenost kterou můžou elektrony cestovat bez deflexe se nazývá střední volná dráha [12].

### 1.3.4 Závislost rezistivity na teplotě

Rezistivita kovů roste s teplotou přibližně lineárně (kromě teplot blízkých absolutní nule). Není žádný důvod domnívat se, že se počet nosičů náboje  $n$  v kovech podstatně snižuje s rostoucí teplotou (v polovodičích počet nosičů náboje stoupá s rostoucí teplotou). Pozornost se tedy bude ubírat k pohyblivosti  $\mu$ . Tepelné kmitání roste v intenzitě úměrně k růstu teploty (kromě velmi nízkých teplot). Toto rostoucí kmitání zkracuje střední volnou dráhu elektronů, za snižující se pravidelnosti krystalu. Proto dochází ke zmenšení pohyblivosti elektronů v kovu.

Pomocí teplotního součinitele rezistivity  $\alpha$  je možno určit závislost rezistivity  $\rho$  na teplotě  $T$  následovně:

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha \Delta T), \quad (21)$$

kde  $\rho_0$  je rezistivita při 20 °C. Hodnota koeficientu je přibližně 0,004 K<sup>-1</sup> pro čisté kovy. To nasvědčuje, že střední volná dráha elektronů je při 250 °C přibližně dvojnásobně redukována než při 0 °C [12].

**Tab. 2:** Teplotní součinitel rezistivity vybraných materiálů  $\alpha$  a jejich rezistivita  $\rho_0$  [1], [11].

Materiál	Teplotní součinitel rezistivity $\alpha$ [K <sup>-1</sup> ]	Rezistivita $\rho_0$ při 20 °C [ $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ ]
Hliník	0,00380	2,650
Měď	0,00429	1,724
Zlato	0,00390	2,240
Stříbro	0,00610	1,590
Železo	0,00641	9,710
Konstantan	0,00300	49,000
Wolfram	0,00450	5,650
Platina	0,00393	10,500
Cín	0,00420	11,000
Kanthal A	0,00006	145,000
Manganin	0,00001	48,000
Nichrom	0,00020	108,000
Nikelin	0,00011	40,000

## 1.4 Termoelektrický článek

Termoelektrické články (termočlánky) jsou zdroje stejnosměrného napětí, v nichž se přeměňuje tepelná energie (tj. teplo) na elektrickou energii. Termoelektrické jevy jsou dány vlastnostmi rozhraní dvou pevných látek [7].

### 1.4.1 Termoelektrické jevy

Různé vlastnosti na rozhraní dvou pevných látek mohou vznikat v důsledku:

1. **Narušení krystalické struktury** - na povrchu pevné látky jsou vazebné síly (a tedy i molekuly, mezi nimiž vazebné síly působí) rozloženy jinak než uvnitř pevné látky. Nevykompenzované vazebné síly mohou přitahovat nebo naopak odpuzovat elektricky nabitě částice z okolí. Uvnitř pevné látky se síly působící na danou částici navzájem kompenzují - v okolí dané částice jsou téměř symetricky rozloženy jiné částice, které působí na danou částici symetricky do všech stran. Na povrchu pevné látky je rozložení částic značně asymetrické, protože pevná látka a okolní prostředí (většinou vzduch) mají velmi rozdílnou hustotu. Proto jsou silové poměry na povrchu pevných látek jiné než v jejím objemu.

2. **Změny rozložení elektricky nabitých částic** - některé povrchové oblasti pevných látek mohou být nabitě. Mohou vznikat tzv. dvojvrstvy (vrstva jedné látky vázaná pomocí elektrostatických sil k vrstvě z jiné látky). Dvojvrstvy mohou vznikat např. na elektrodách při elektrolýze, při určité kombinaci materiálu elektrody a elektrolytu.
3. **Adsorpce** - jev, při kterém je částice z okolí pevné látky vázána k povrchu pevné látky, ale neproniká dovnitř do její struktury. V důsledku nabití pevné látky může tato látka přitahovat drobné předměty z okolí (prach, chmýří, atd.), čímž se mění vlastnosti povrchu pevné látky (jiná odrazivost světla, elektrická vodivost, atd.).
4. **Absorpce** - částice z okolí pevné látky proniká do struktury pevné látky. Tímto způsobem mohou vlastnosti pevných látek ovlivňovat např. částice radioaktivního záření.
5. **Ultračistých povrchů** - tyto technologie se používají ke speciálním úpravám povrchů pevných látek, a to k nanášení vrstev další látky (změna elektrické vodivosti povrchu, odrazivosti světla, atd.) a výrobě přesných součástek (vědecké přístroje, měřicí technika, nové technologie, atd.).
6. **Termoemise** - volné elektrony opouštějí povrch pevné látky (kovy a polovodiče) a dostávají se do okolí. Při termoemisi se uvolňují ty elektrony, které mají dostatečnou energii, aby mohly opustit povrch pevné látky. Tato energie musí být větší než je tzv. výstupní práce, tj. energie nutná na přerušení sil, kterými je elektron přitahován k atomovým jádrům dané látky. Z hlediska pásové struktury se jedná o ty elektrony, které se nachází ve vodivostním pásu [7].

#### 1.4.2 Termoemise (termoelektronová emise)

Při zahřívání kovu získají některé volné elektrony energii, která je větší nebo rovna výstupní práci  $W_V$ , která stačí k překonání jejich vazby v kovu a dojde k uvolnění elektronu z kovu tj. opustí kov a dostanou se do okolního prostředí (vakuum, vzduch, atd.). Výstupní práce  $W_V$  představuje energetickou bariéru, kterou musí vodivostní elektron překonat, aby opustil pevnou látku. Výstupní práce  $W_V$  se odpočítává od Fermiho energie  $W_F$  po hladinu vakua  $W_0$  považovanou za nulovou tzn.  $W_0 = 0$  eV, tj.  $W_V = W_0 - W_F$  [5].

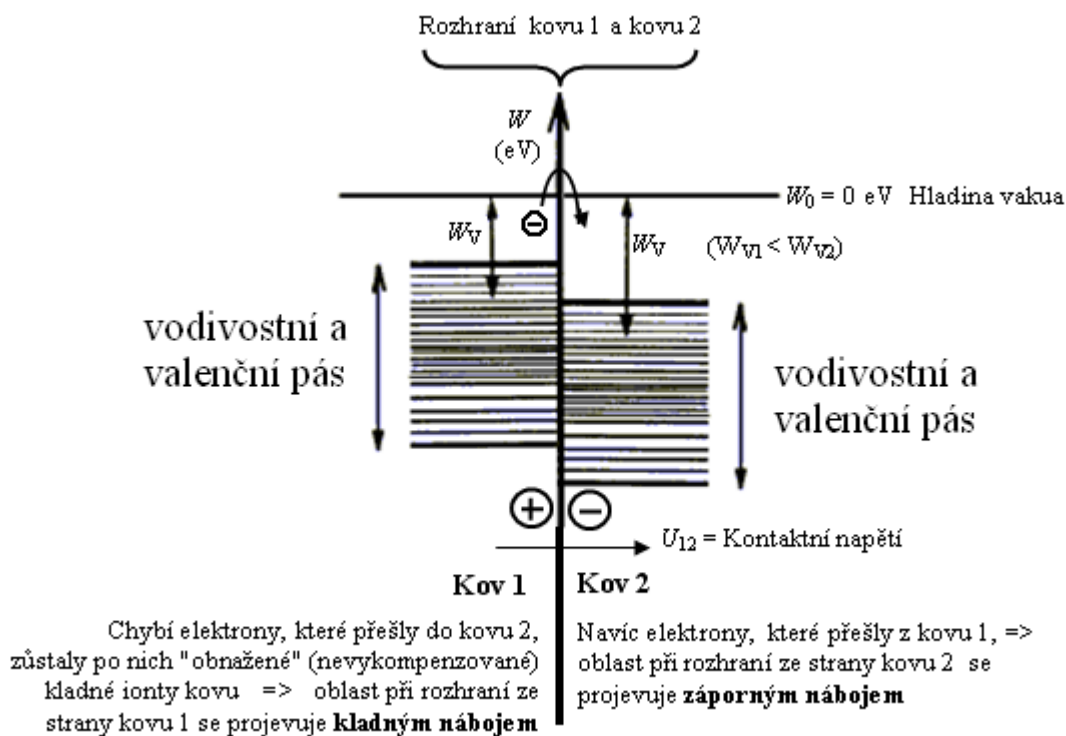
#### 1.4.3 Kontaktní potenciál

Pro konstrukci termočlánku je nutno vytvořit mezi dvěma kovy rozdíl napětí (kontaktní napětí). Kovy se používají proto, že obsahují volné nosiče náboje (elektrony). Má-li termočlánek být zdrojem elektrického napětí v elektrickém obvodu, musí jím procházet

elektrický proud, tj. volné nabité částice. Toto kontaktní napětí, které vzniká při vzájemném dotyku dvou kovů, závisí na chemickém složení dotýkajících se kovů a na jejich teplotě. Italský fyzik Alessandro Volta vytvořil Voltův sloupek. Jednalo se o první relativně stálý zdroj elektrického napětí, který byl vyroben. Volta jej zkonstruoval s využitím řady kovů, kterou na základě svých experimentů vytvořil [7]:

(+) Al - Zn - Pb - Sn - Sb - Bi - Hg - Fe - Cu - Ag - Au - Pt - Pd (-)

Každý kov v této řadě vytvoří při dotyku s libovolným dalším kovem určité kontaktní napětí. Kovy jsou seřazeny podle výstupní práce  $W_v$ , kterou musí elektron získat, aby opustil daný kov. Ve směru od hliníku k palladiu výstupní práce roste. To znamená, že z hliníku se uvolňují elektrony snadněji než z palladia. Proto se prvky s vyšší výstupní prací nabíjí záporně, zatímco prvky s nižší výstupní prací se nabíjí kladně. Jestliže se elektron např. z hliníku uvolní snadněji než z mědi, vzniká v hliníku po elektronu „prázdné místo“ - tj. hliník má kladný náboj. Část záporného náboje si odnesl elektron. Tento elektron se předá dalšímu kovu, s nímž je hliník spojen - např. měď. Proto se měď nabíjí záporně, snáze elektrony (se záporným nábojem) přijímá, než vydává [7].



Obr. 1: Pásový model na rozhraní dvou kovů [5]

Výstupní práce  $W_v$  kovů je závislá na teplotě. Proto je na teplotě závislý i kontaktní potenciál daného kovu  $\varphi$  podle vztahu

$$\varphi = \frac{W_V}{q}, \quad (22)$$

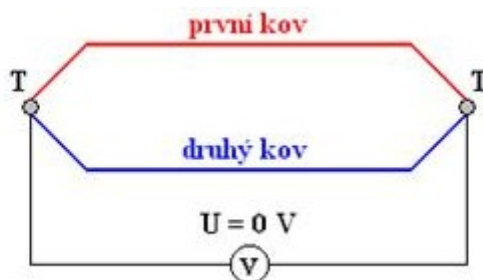
kde  $q$  je náboj nosiče náboje [5].

Velikost rozdílu potenciálů obou kovů v místě doteku je úměrná rozdílu výstupních prací elektronů z kovů a poměru koncentrací volných elektronů v obou kovech. Jsou-li kovy v dané dvojici označeny symboly 1 a 2, lze pro dotekový rozdíl potenciálů při teplotě  $T$  stykového místa psát základní vztah.

$$U_{12} = \varphi_2 - \varphi_1 + \frac{kT}{q} \ln \frac{n_2}{n_1}, \quad (23)$$

v němž  $\varphi$  značí výstupní potenciály, číselně rovné výstupním pracím elektronů, vyjádřených v eV,  $n$  je koncentrace volných elektronů,  $k$  je Boltzmannova konstanta,  $q$  náboj nosiče náboje a  $T$  je absolutní teplota. Rozdíly v koncentracích elektronů nejsou u kovů příliš odlišné, proto o velikosti  $U_{12}$  podle vztahu (23) rozhoduje v podstatě rozdíl kontaktních potenciálů. Vzhledem k tomu, že kontaktní potenciály kovů závisí na teplotě, závisí i rozdíl kontaktních potenciálů na teplotě. S rostoucí teplotou rozdíl potenciálů vzrůstá.

Je-li teplota na obou rozhraních dvou kovů, které jsou spojeny k sobě podle obr. 2, stejná, nelze tento děj využít jako zdroj elektrického napětí (resp. elektrického proudu). Napětí na obou rozhraních jsou stejná a výsledné napětí měřené mezi oběma spoji je proto nulové.

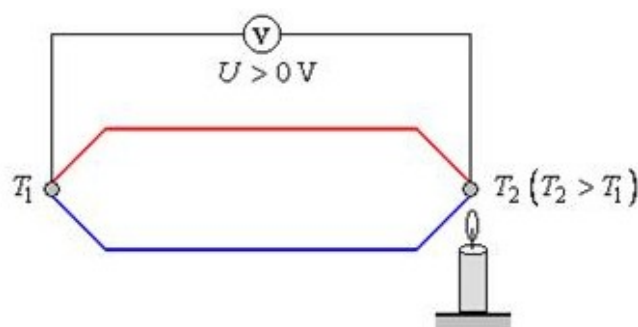


**Obr. 2:** Rozhraní dvou kovů bez rozdílu teplot na kontaktních ploškách [7]

Právě popsáný jev lze využít tehdy, jsou-li teploty (a tedy i kontaktní napětí) na dvou rozhraních kovů různé. K tomu dochází při Seebeckovu jevu [8].

#### 1.4.4 Seebeckův jev

Je-li dvojice kovů spojena na dvou místech, vystavených různým teplotám (obr. 3), vzniká v obvodu termoelektrické napětí  $U_t$ , dané součtem rozdílů dotekových potenciálů v místech styku.



**Obr. 3:** Termočlánek s rozdílem teplot na dvou kontaktních ploškách dvou kovů [7]

Platí-li  $T_2 > T_1$ , pak po aplikaci vztahu (23) na případ obou stykových míst, po provedení součtu obou získaných výrazů a po úpravě plyne pro termoelektrické napětí

$$U_t = \frac{k}{q} (T_2 - T_1) \ln \frac{n_2}{n_1} . \quad (24)$$

Při měření teplot pomocí termočláneků se spoj umístěný v měřeném prostoru o teplotě  $\vartheta_M$  nazývá měřicí, spoj umístěný v prostoru se stabilizovanou teplotou  $\vartheta_S$  se nazývá srovnávací. Rozdíl absolutních teplot v rovnici (24) lze nahradit rozdílem teplot  $\vartheta_M$  a  $\vartheta_S$  udaných ve °C. Jestliže se s teplotou nemění poměr koncentrací  $n_1/n_2$ , nebo je alespoň změna zanedbatelná, lze rovnici (24) přepsat do tvaru

$$U_t = A (\vartheta_M - \vartheta_S) , \quad (25)$$

kde  $A$  je konstanta pro určitou dvojici kovů.

Lineární závislost podle rovnice (25) vyhovuje pouze v úzkém teplotním intervalu. V širokém teplotním rozsahu je závislost termoelektrického napětí na rozdílu teplot měřicího a srovnávacího spoje nahrazována matematickou funkcí vyššího řádu. Koeficienty  $A_i$  této náhradní funkce jsou definovány pro teplotu srovnávacího spoje termočlánek  $\vartheta_S = 0$  °C. Rovnice má tvar

$$U_t = \sum_{i=0}^n A_i \vartheta^i , \quad (26)$$

kde  $\vartheta$  je teplota měřicího spoje.

Rovnice (26) může být až čtrnáctého stupně a je pro praxi příliš složitá. V úzkém teplotním intervalu ji lze nahradit lineární funkcí (27) nebo v širším rozsahu teplot kvadratickou závislostí (28).

$$U_t = A_1 \vartheta, \quad (27)$$

$$U_t = A_1 \vartheta + A_2 \vartheta^2. \quad (28)$$

Závislost  $U_t = f(\vartheta)$  při nulové teplotě srovnávacího konce termočlánku prochází počátkem souřadnicového systému, tedy koeficient  $A_0$  v rovnici (26) je vždy roven nule [8].

### 1.4.5 Typy termočlánků

Termoelektrické napětí vzniká, jestliže jsou spojeny vodiče ze dvou různých kovů. Z hlediska měření je však potřebné, aby generované termoelektrické napětí bylo co největší a aby oba kovy byly co nejodolnější proti vlivům okolního prostředí, tak aby se jejich vlastnosti co nejméně měnily v průběhu času. Tomu vyhovuje jen několik dvojic materiálů [2].

**Tab. 3:** Typy termočlánků a jejich základní vlastnosti [2], [10].

Typ termočlánku	Označení termočlánku	Měřicí rozsah [°C]	$A_1$ [ $\mu\text{VK}^{-1}$ ]	$A_2$ [ $\mu\text{VK}^{-1}$ ]
R	PtRh13-Pt	0 až 1600	5,2890	0,01392
S	PtRh10-Pt	0 až 1600	5,4030	0,01259
J	Fe-CuNi	-200 až 750	50,3810	0,03047
T	Cu-CuNi, Cu-ko	-200 až 350	38,7480	0,03329
E	NiCr-CuNi, ch-ko	-100 až 900	58,6650	0,04503
K	Ni-Cr-Ni, ch-a	-200 až 1200	39,4501	0,02362
N	NiCrSi-NiSi	-200 až 1200	25,9290	0,01571



## 2 Praktická část

Praktická část se zabývá vytvořeným programem, který má sloužit pro simulaci, studium a výuku vybraných materiálových veličin popsanych v teoretické části. V rámci tohoto programu je vytvořena databáze vybraných materiálových konstant, důležitých pro fyzikální závislosti charakterizující uvedené teoretické okruhy.

### 2.1 Programové prostředí

Jako vhodný programovací jazyk byl na začátku práce zvolen jazyk C++ a programovací prostředí Microsoft Visual Studio 2008 a to díky zkušenostem, které byly nabyty v již absolvovaném předmětu "Počítače a programování 2".

#### 2.1.1 Programovací jazyk C++

Programovací jazyk C++ byl vyvinut v Bell Labs (podobně jako jazyk C), začátkem osmdesátých let Bjarnem Stroustrupem. C++ je objektově orientovaný jazyk který je rozšířením programovacího jazyku C a téměř všechny programy napsané v C jsou v C++ až na výjimky přeložitelné. C++ podporuje několik programovacích stylů jako je procedurální programování, objektově orientované programování a generické programování [6].

#### 2.1.2 Programovací prostředí Microsoft Visual Studio 2008

Microsoft Visual Studio je vývojové prostředí pro platformu Microsoft Windows, toto prostředí je velmi rozšířené především kvůli velkému množství funkcí, usnadňujících programování projektů. Microsoft Visual Studio je vybaveno kompilátory pro všechny programovací jazyky které podporuje C, C++, C#, Visual Basic a J#.

### 2.2 Popis jednotlivých částí programu

Program je pro přehlednost členěn pomocí záložek (modulů) na tyto části:

1. Úvod
2. Komplexní permitivita
3. Komplexní permitivita - teorie
4. Teplotní roztažnost
5. Teplotní roztažnost - teorie
6. Teplotní závislost rezistivity
7. Teplotní závislost rezistivity - teorie

8. Termoelektrické napětí
9. Termoelektrické napětí - teorie
10. Konstanty

### 2.2.1 Záložka - Úvod

Úvod je první záložka, která se uživateli zobrazí ihned po spuštění programu "Modulární interaktivní simulace materiálových veličin". Úvodní obrazovka poskytuje uživateli základní informace o programu (název programu, název školy, fakulty a ústavu pod záštitou kterých program vznikl, jméno autora a odborného vedoucího práce)



Obr. 4: Záložka - Úvod

## 2.2.2 Záložka - Komplexní permitivita

Záložka s názvem "Komplexní permitivita" je rozdělena do pěti skupin pomocí komponentů *GroupBox*, první skupina s názvem "Vzorce" zobrazuje materiálové vztahy, ze kterých program vypočítává frekvenční průběhy složek komplexní permitivity a ztrátového činitele. Druhá skupina "Vstupní veličiny" obsahuje tři *NumericUpDown* členy, pomocí kterých lze měnit hodnoty vstupních parametrů  $\epsilon_s$ ,  $\epsilon_\infty$  a  $\tau$  pro vypočítání závislostí složek komplexní permitivity na frekvenci. Třetí skupina "Graf" je dále rozdělena záložkami (*TabControl*) na tři části "Relativní permitivita", "Ztrátové číslo" a "Ztrátový činitel". Je to oblast pro grafické vykreslení fyzikálních závislostí složek komplexní permitivity a ztrátového činitele na frekvenci elektrického pole. Čtvrtá skupina "Odečtení hodnoty z grafu" poskytuje uživateli možnost odečíst hodnotu pro zadanou frekvenci z aktuálně zobrazované závislosti ve skupině "Graf". Pátá skupina "Výpis do souboru" umožňuje uživateli získat výpis hodnot, vypočtených ze zadaných parametrů, do souboru "Vypis.txt". Počet hodnot je uživatelem zadán.

### Vzorce

Vzorce ze kterých program vypočítává průběh závislostí jsou Debyovy rovnice pro relativní permitivitu (8) a ztrátové číslo (9), vycházející z rovnice (7), jejím rozložením na reálnou a imaginární složku, a rovnici pro ztrátový činitel (6). Tyto rovnice jsou do programu vloženy pomocí obrázků zobrazených v komponentech *PictureBox*. Popisky vzorců jsou vytvořeny pomocí komponentu *Label*.

### Vstupní veličiny

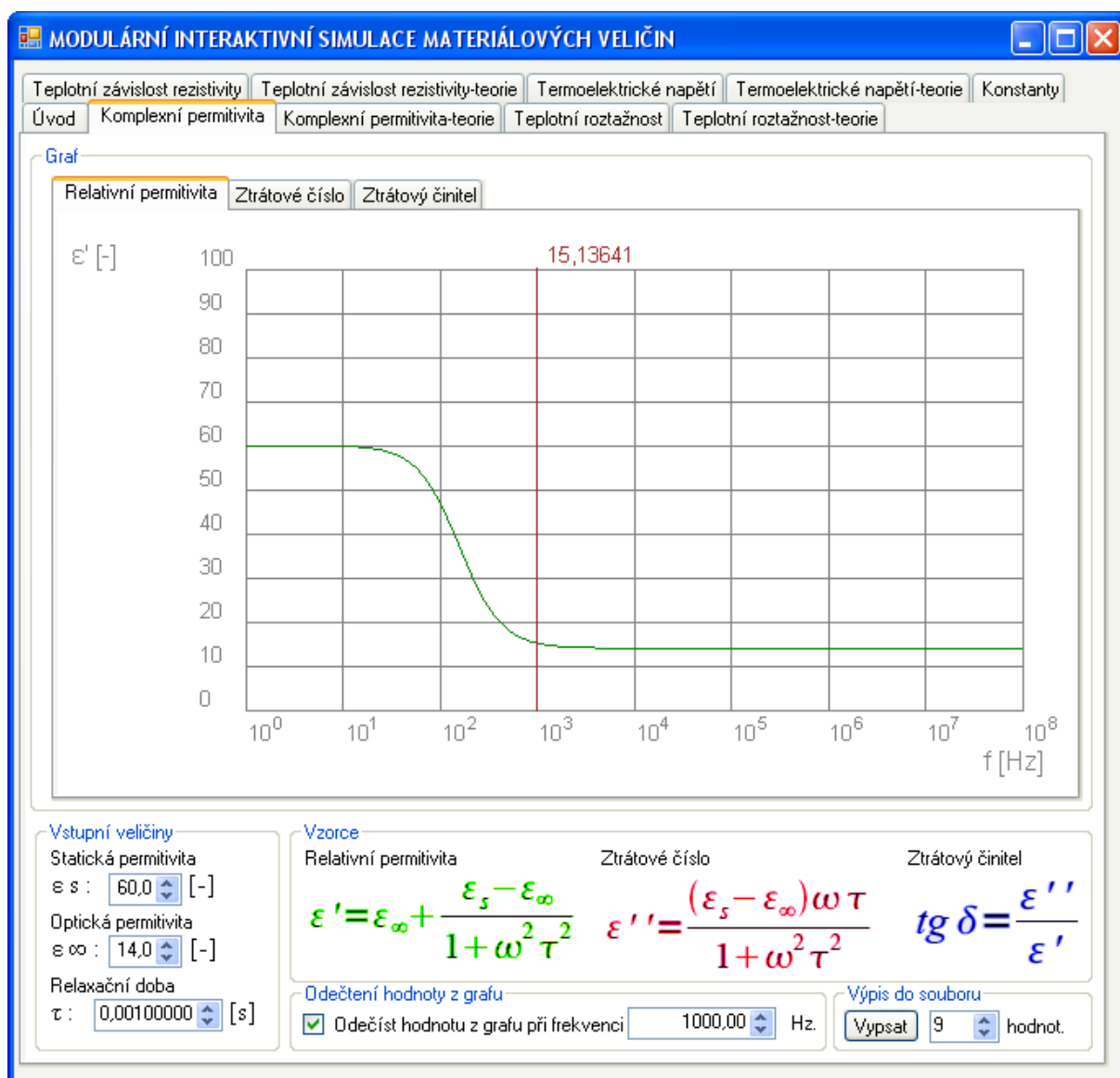
Skupina "Vstupní veličiny" obsahuje tři *NumericUpDown* členy, pomocí kterých jsou nastavovány hodnoty parametrů statické permitivity  $\epsilon_s$  (hodnoty od 1 do 100), optické permitivity  $\epsilon_\infty$  (hodnoty od 1 do 100) a relaxační doby  $\tau$  (hodnoty od  $1 \cdot 10^{-8}$  do 0,1 s). Program při každé jejich změně spustí funkci, která načte hodnotu těchto členů, ty poté vstupují do hlavní funkce, kde jsou z nich vypočítány podle vzorců data pro vykreslování grafu. Popisky jsou vytvořeny pomocí komponentů *Label*.

### Graf

Skupina "Graf" je určena pro vykreslování závislostí vypočítaných podle vzorců ze vstupních veličin a je rozdělena do tří částí pomocí záložek ("Relativní permitivita", "Ztrátové číslo" a "Ztrátový činitel"). Funkce pro vykreslení grafu je volána pokaždé, při změně hodnoty kteréhokoli ze vstupních parametrů. Nejprve je spuštěna funkce, pomocí níž je vykreslen bílý obdélník, který kompletně překryje graf vykreslený před změnou hodnoty vstupních veličin, tím se zajistí volná plocha pro vykreslení aktuálního grafu s novými vstupními veličinami. Další funkcí jsou vykresleny osy rovnoběžné s osami x i y a hodnoty na

osách. Měřítka a počet os rovnoběžných s osou x je generován automaticky v závislosti na vypočtených hodnotách. Popisky os jsou vytvořeny pomocí komponentu *Label*. Nakonec je volána funkce vykreslující křivku, upravenou měřítkem, podle vypočítaných hodnot ze vstupních veličin.

V dalších modulech, simulujících fyzikální závislosti, je tato skupina vytvořena obdobně, nebude tedy znovu popisována.



**Obr. 5:** Záložka - Komplexní permitivita, závislost permitivity na frekvenci elektrického pole

### Odečtení hodnoty z grafu

Ve skupině pro odečtení z grafu je použit jeden *CheckBox*, pomocí něhož uživatel sdělí programu, zda chce odečíst hodnotu z grafu pro zadanou frekvenci, kterou nastaví pomocí

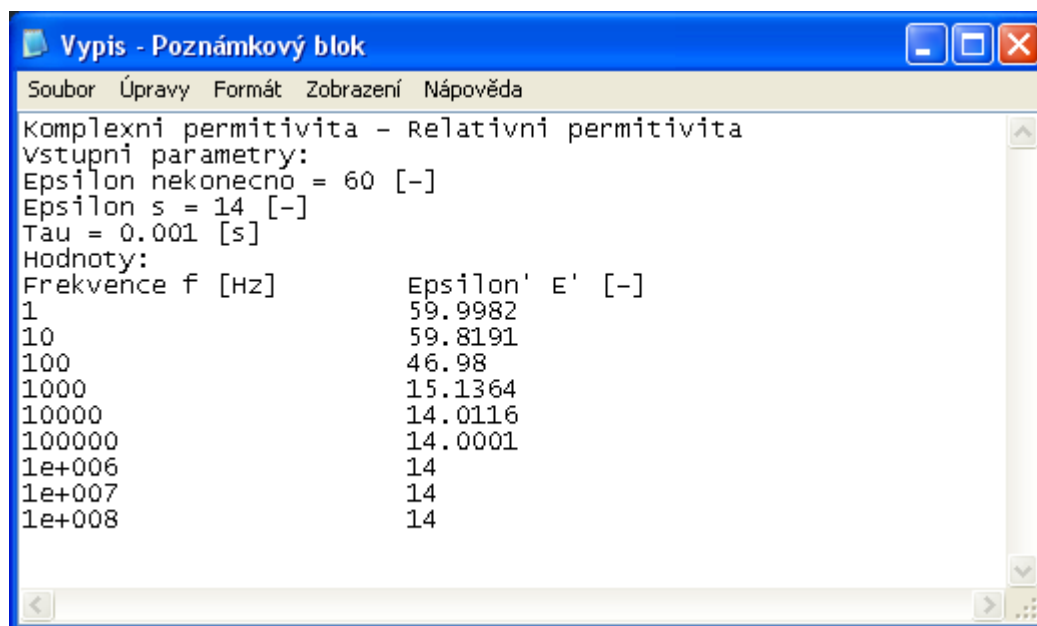
*NumericUpDown* členu (od 1 do  $10^8$  Hz), obsaženého v této skupině. Po potvrzení *CheckBoxu* se spustí funkce pro vykreslení grafu a navíc se ve skupině "Graf" zobrazí pomocná svislá čára protínající graf na hodnotě zadané frekvence. V oblasti nad grafem se vypíše odečtená hodnota pro tuto frekvenci.

V dalších modulech, simulujících fyzikální závislosti, je tato skupina vytvořena obdobně, nebude tedy znovu popisována.

### Výpis do souboru

Ve skupině "Výpis do souboru" je použit komponent *Button* (tlačítko) s textem "Vypsat". Po stisku tohoto tlačítka je spuštěna funkce pro zjištění hodnoty zadané v komponentu *NumericUpDown* v této skupině (hodnoty od 2 do 101). Zjištěné číslo je počet hodnot, které budou vypsány do souboru "Vypis.txt". Poté funkce vypočte, podle zjištěného počtu hodnot, frekvence ze zobrazovaného rozsahu ( $1-10^8$  Hz), pro něž budou dále vypočteny hodnoty pro aktuálně zobrazovanou závislost. Funkce vytvoří v adresáři, ve kterém se program nachází, soubor "Vypis.txt" a postupně do něj zapíše název zobrazované závislosti, vstupní veličiny a pod sebe frekvence a k nim vypočtené hodnoty relativní permitivity, ztrátového čísla, nebo ztrátového činitele, podle vybrané záložky v části "Graf".

V dalších modulech, simulujících fyzikální závislosti, je tato skupina vytvořena obdobně, nebude tedy znovu popisována.



Obr. 6: Příklad výpisu 9 hodnot pro relativní permitivitu

### 2.2.3 Záložka - Teplotní roztažnost

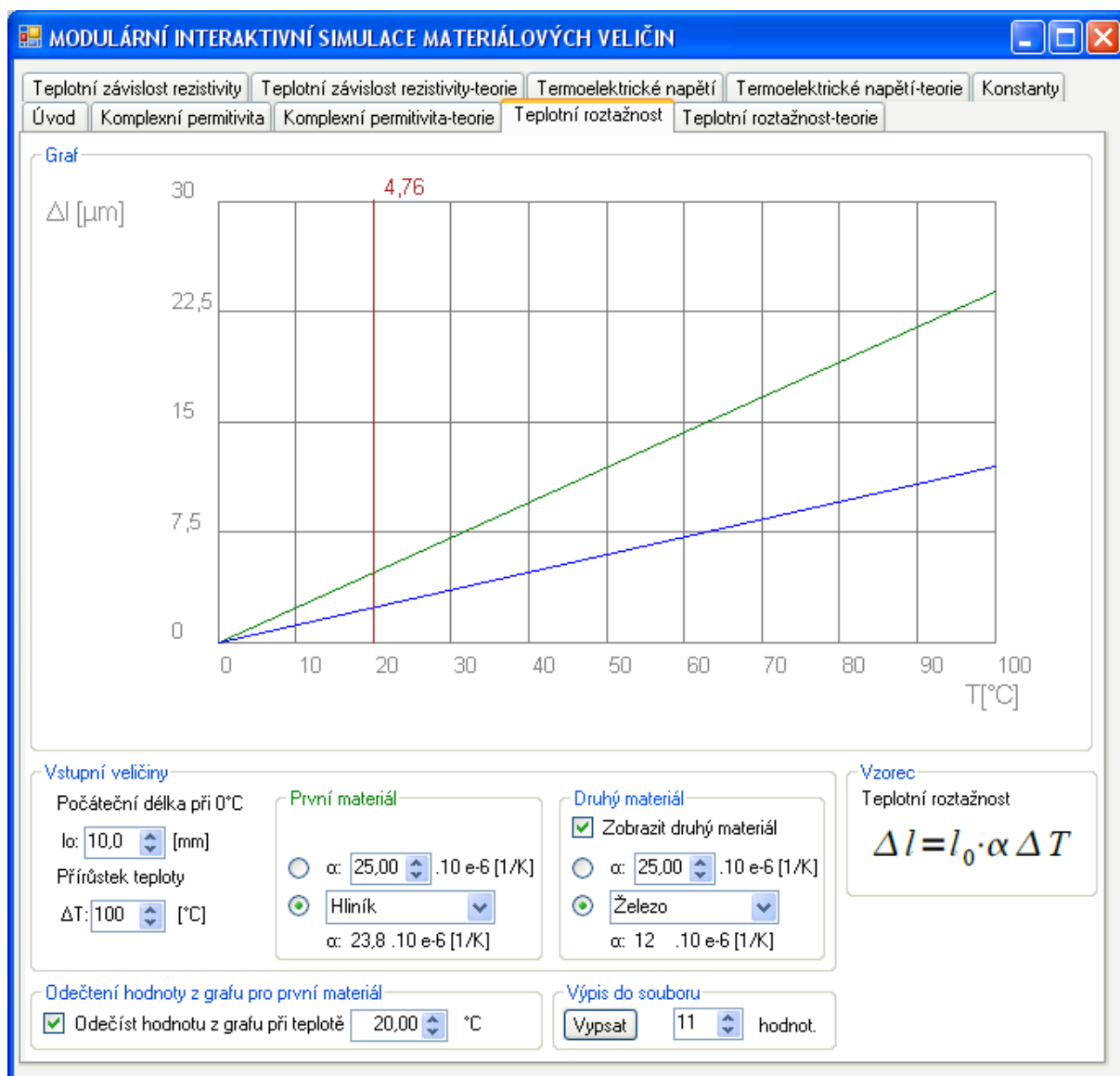
Záložka s názvem "Teplotní roztažnost" je rozdělena do pěti skupin (obdobně jako záložka "Komplexní permitivita") pomocí komponentů *GroupBox*. První skupina s názvem "Vzorec" zobrazuje vzorec, ze kterého program vypočítává křivku teplotní roztažnosti. Druhá skupina "Vstupní veličiny" obsahuje dva *NumericUpDown* členy, pomocí kterých lze měnit hodnotu počáteční délky  $l_0$  (od 1 do 1000 mm) a přírůstek teploty  $\Delta T$  (od 100 do 1000 °C) a dva *GroupBox* členy, ve kterých je zadána hodnota součinitele teplotní roztažnosti  $\alpha$  pro dva materiály. Z těchto veličin je vypočtena křivka délkové teplotní roztažnosti daného materiálu. Třetí skupina "Graf" je oblast pro grafické vykreslení závislosti délkové roztažnosti tyče na teplotě. Tato skupina je podobná skupině "Graf" v kapitole 2.2.2. Čtvrtá skupina "Odečtení hodnoty z grafu" poskytuje uživateli možnost odečíst hodnotu, pro zadanou teplotu, na křivce zobrazované ve skupině "Graf" (popsáno v kapitole 2.2.2). Pátá skupina "Výpis do souboru" umožňuje uživateli získat výpis hodnot, vypočtených ze zadaných parametrů, do souboru "Vypis.txt" (popsáno v kapitole 2.2.2).

#### Vzorec

Ve skupině "Vzorec" je pomocí *PictureBox* zobrazen vzorec (15) pro výpočet přírůstku délky v závislosti na změně teploty. Popisek vzorce je vytvořen pomocí komponentu *Label*.

#### Vstupní veličiny

Skupina "Vstupní veličiny" obsahuje dva *NumericUpDown* členy, kterými jsou nastavovány hodnoty počáteční délky při 0 °C  $l_0$  (od 1 do 1000 mm) a přírůstek teploty  $\Delta T$  (od 100 do 1000 °C). Dále tato skupina obsahuje dvě podskupiny, vytvořené pomocí komponentů *GroupBox* pro dva materiály, ve kterých se zadává součinitel délkové teplotní roztažnosti  $\alpha$ . Křivka pro první materiál je vykreslena vždy. Křivka pro druhý materiál bude programem vykreslena pouze, je-li zatrhnut *CheckBox* ve druhém *GroupBoxu* s nápisem "Zobrazit druhý materiál". V obou těchto skupinách lze součinitel teplotní délkové roztažnosti určit buď zadáním hodnoty v *NumericUpDown* komponentu, nebo vybráním určitého materiálu z předdefinované databáze z nabídky *ComboBox* komponentů. Při změně vybraného materiálu z *ComboBox* nabídky se automaticky změní text v komponentu *Label*, oznamující hodnotu součinitele délkové teplotní roztažnosti  $\alpha$  viz tab. 1. Program při každé změně parametrů spustí funkci, která načte hodnotu těchto členů, ty poté vstupují do hlavní funkce, kde jsou z nich vypočítány podle vzorců data pro vykreslování grafu. Popisky jsou vytvořeny pomocí komponentů *Label*.



Obr. 7: Záložka - Teplotní roztažnost

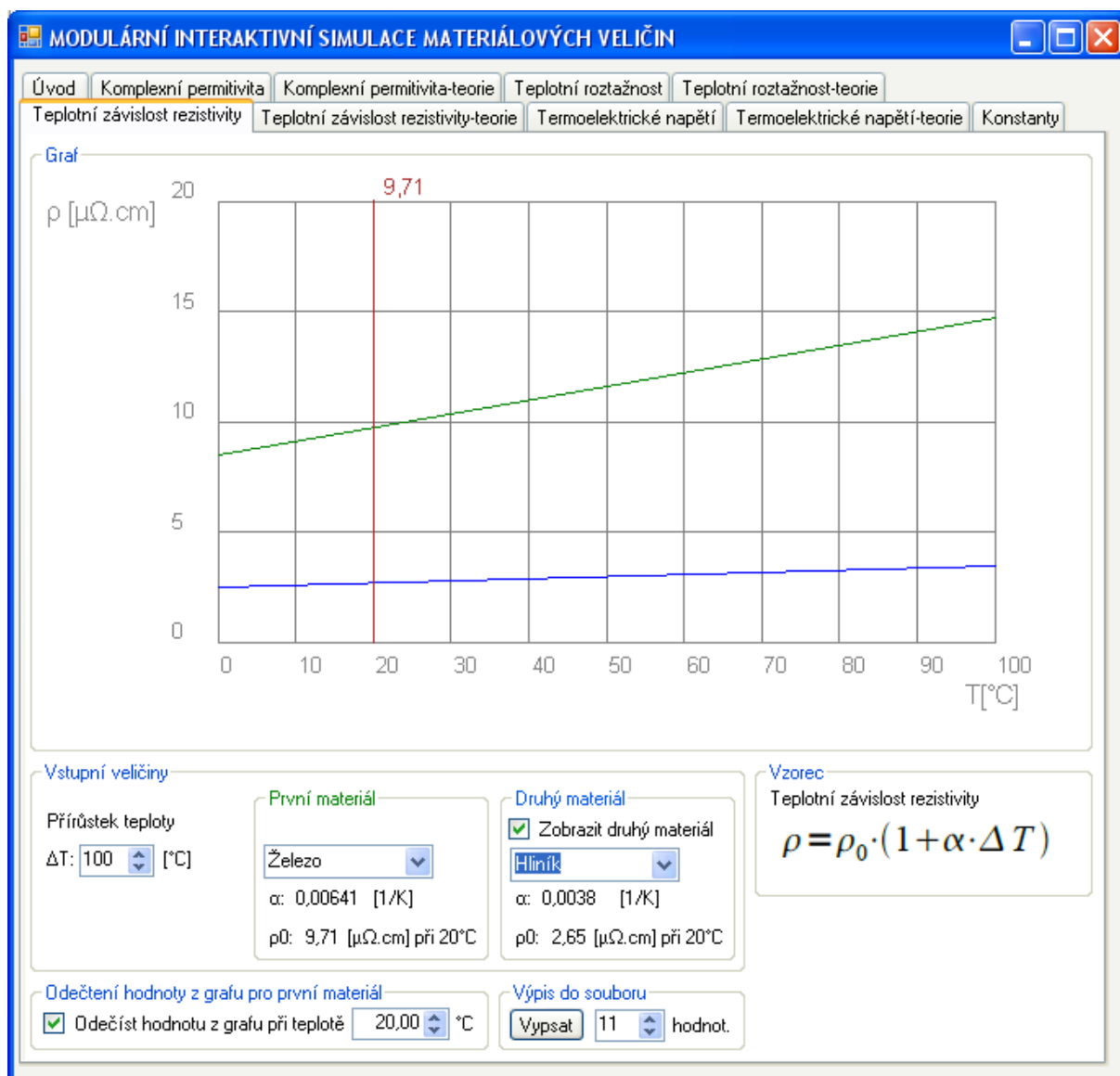
## 2.2.4 Záložka - Teplotní závislost rezistivity

Záložka s názvem "Teplotní závislost rezistivity" je rozdělena do pěti skupin, obdobně jako záložka "Komplexní permitivita", pomocí komponentu *GroupBox*. První skupina s názvem "Vzorec" zobrazuje vzorec, ze kterého program vypočítává křivku teplotní závislosti rezistivity. Druhá skupina "Vstupní veličiny" obsahuje *NumericUpDown* člen, kterým lze měnit přírůstek teploty  $\Delta T$  (od 100 do 1000 °C), a dva *GroupBox* členy, ve kterých je zadána hodnota teplotního součinitele rezistivity  $\alpha$  a rezistivity při 20 °C pro dva materiály. Z těchto veličin je vypočtena křivka závislosti rezistivity daného materiálu na teplotě. Třetí skupina "Graf" je oblast pro grafické vykreslení závislosti rezistivity materiálu na teplotě. Tato skupina je podobná skupině "Graf" v kapitole 2.2.2. Čtvrtá skupina "Odečtení

hodnoty z grafu" poskytuje uživateli možnost odečíst hodnotu pro zadanou teplotu na křivce zobrazované ve skupině "Graf" (popsáno v kapitole 2.2.2). Pátá skupina "Výpis do souboru" umožňuje uživateli získat výpis hodnot, vypočtených ze zadaných parametrů, do souboru "Vypis.txt" (popsáno v kapitole 2.2.2).

### Vzorec

Ve skupině "Vzorec" je pomocí *PictureBox* zobrazen vzorec (21) pro výpočet rezistivity v závislosti na změně teploty. Popisek vzorce je vytvořen pomocí komponentu *Label*.



**Obr. 8:** Záložka - Teplotní závislost rezistivity



### Vstupní veličiny

Skupina "Vstupní veličiny" obsahuje jeden *NumericUpDown* člen, kterým je nastavován přírůstek teploty  $\Delta T$  (od 100 do 1000 °C). Dále tato skupina obsahuje dvě podskupiny, vytvořené pomocí komponentů *GroupBox* pro dva materiály, ve kterých se zadává teplotní součinitel rezistivity  $\alpha$  a rezistivita  $\rho_0$  při 20 °C vybráním určitého materiálu z nabídky *ComboBox* komponentu. Křivka pro první materiál je vykreslena vždy. Křivka pro druhý materiál bude programem vykreslena pouze, je-li zatrhnut *CheckBox* ve druhém *GroupBoxu* s nápisem "Zobrazit druhý materiál". Při změně vybraného materiálu z *ComboBox* nabídky se automaticky změní text v komponentech *Label*, oznamujících hodnotu teplotního součinitele rezistivity  $\alpha$  a rezistivity  $\rho_0$  při 20 °C. Tyto hodnoty se shodují s hodnotami v tab. 2. Program při každé změně parametrů spustí funkci, která načte hodnotu těchto členů, ty poté vstupují do hlavní funkce, kde jsou z nich vypočítány podle vzorců data pro vykreslování grafu. Popisky jsou vytvořeny pomocí komponentů *Label*.

### 2.2.5 Záložka - Termoelektrické napětí

Záložka s názvem "Termoelektrické napětí" je rozdělena do pěti skupin, obdobně jako záložka "Komplexní permitivita", pomocí komponentu *GroupBox*. První skupina s názvem "Vzorec" zobrazuje vzorec, ze kterého program vypočítává křivku termoelektrického napětí termočlánu. Druhá skupina "Vstupní veličiny" obsahuje *NumericUpDown* člen, kterým lze měnit maximální teplotu  $T$  (od 100 do 1000 °C), a dva *GroupBox* členy, ve kterých jsou zadány konstanty termočlánu  $A_1$  a  $A_2$ . Z těchto veličin je vypočtena křivka závislosti termoelektrického napětí daného termočlánu na teplotě. Třetí skupina "Graf" je oblast pro grafické vykreslení závislosti termoelektrického napětí termočlánu na teplotě. Tato skupina je podobná skupině "Graf" v kapitole 2.2.2. Čtvrtá skupina "Odečtení hodnoty z grafu" poskytuje uživateli možnost odečíst hodnotu pro zadanou teplotu na křivce zobrazované ve skupině "Graf" (popsáno v kapitole 2.2.2). Pátá skupina "Výpis do souboru" umožňuje uživateli získat výpis hodnot, vypočtených ze zadaných parametrů, do souboru "Vypis.txt" (popsáno v kapitole 2.2.2).

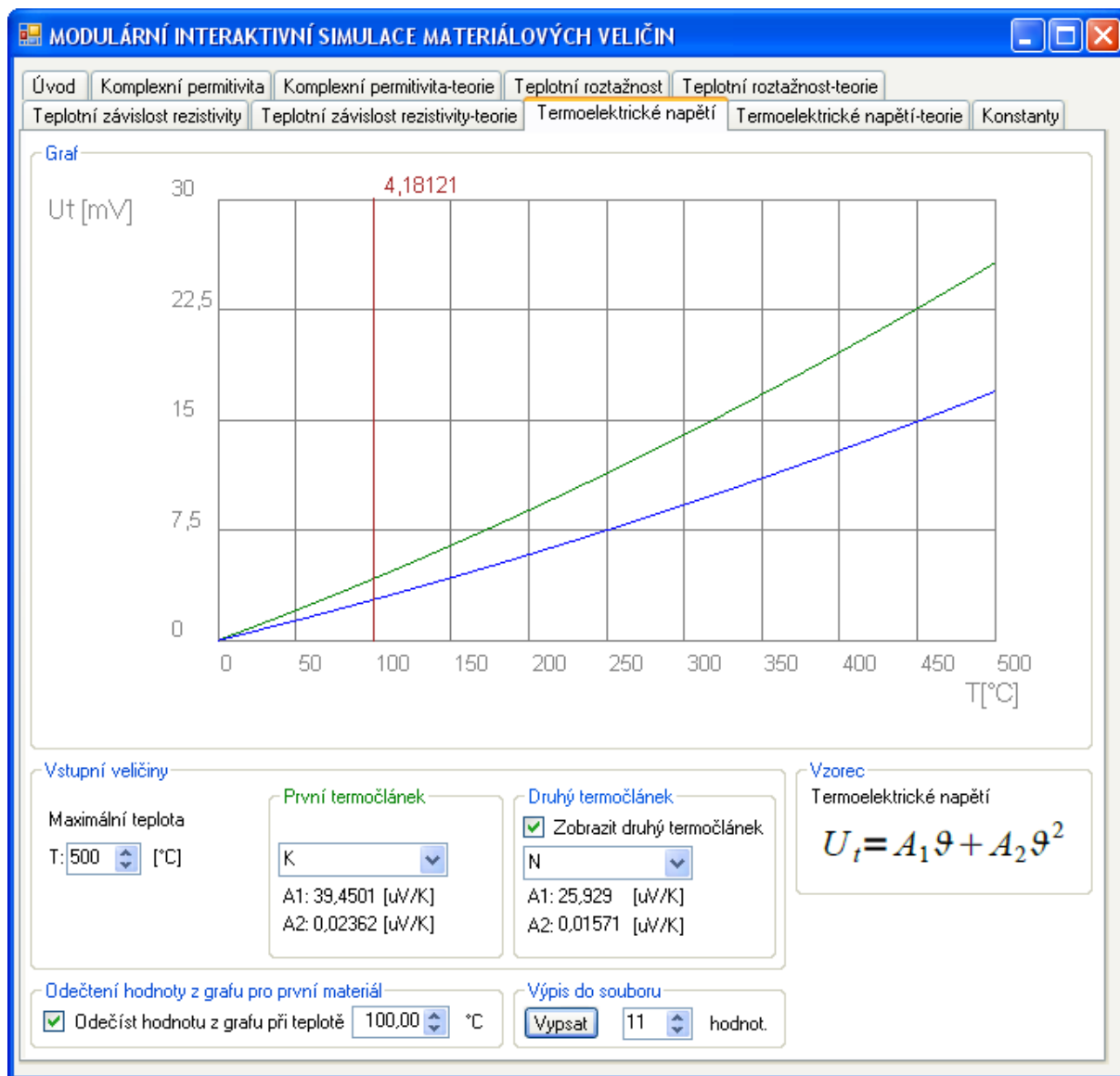
#### Vzorec

Ve skupině "Vzorec" je pomocí *PictureBox* zobrazen vzorec (28) pro výpočet napětí na termočlánu v závislosti na teplotě. Popisek vzorce je vytvořen pomocí komponentu *Label*.

#### Vstupní veličiny

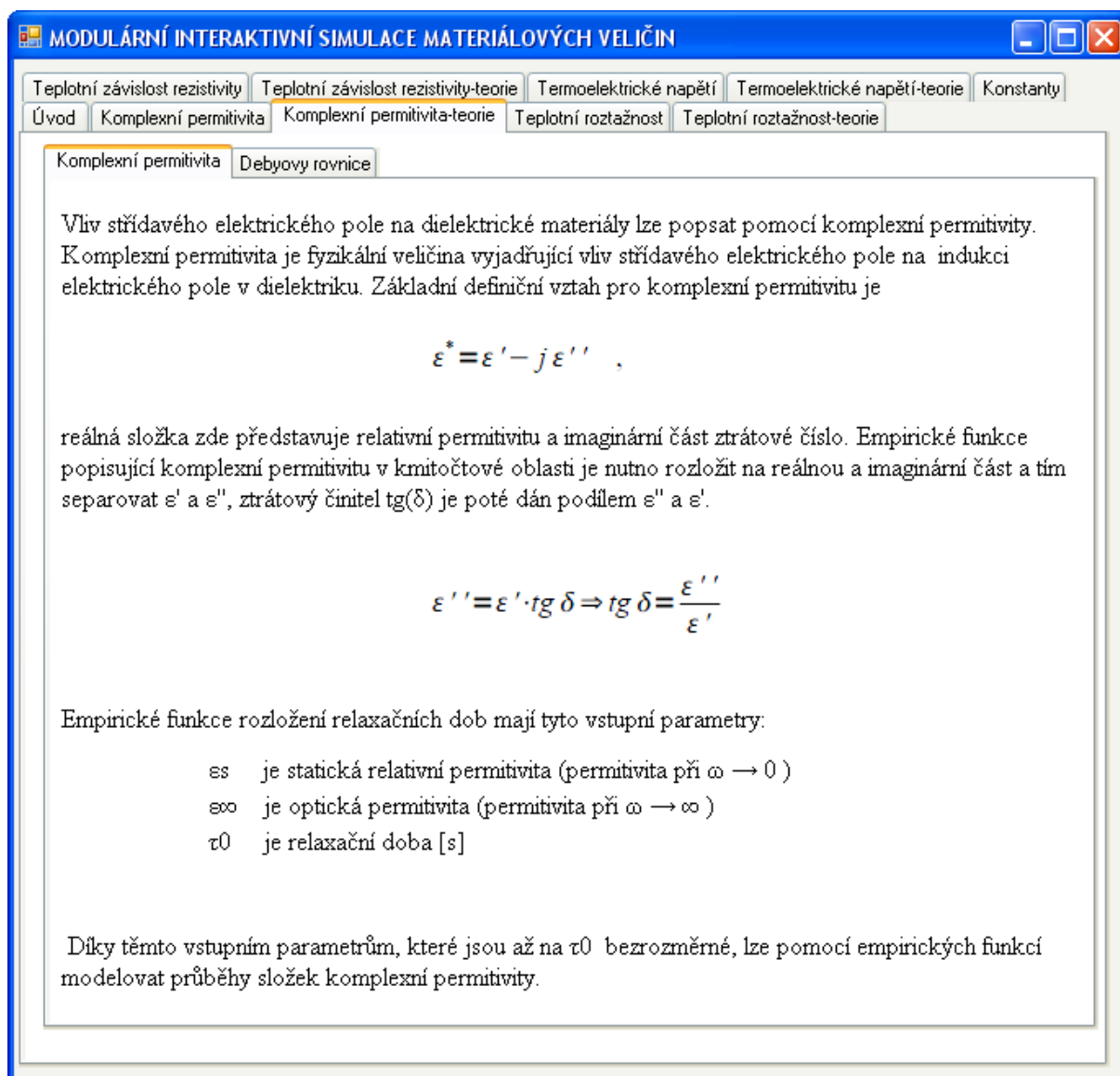
Skupina "Vstupní veličiny" obsahuje jeden *NumericUpDown* člen, kterým je nastavována maximální teplota  $T$  (od 100 do 1000 °C). Dále tato skupina obsahuje dvě podskupiny, vytvořené pomocí komponentů *GroupBox* pro dva termočlány, ve kterých se

zadávají koeficienty termočlánek  $A_1$  a  $A_2$ , vybráním určitého termočlánek z nabídky *ComboBox* komponentu. Křivka pro první termočlánek je vykreslena vždy. Křivka pro druhý termočlánek bude programem vykreslena pouze, je-li potvrzen *CheckBox* ve druhém *GroupBoxu* s nápisem "Zobrazit druhý termočlánek". Při změně vybraného termočlánek z *ComboBox* nabídky se automaticky změní text v komponentech *Label*, oznamujících hodnotu koeficientů termočlánek  $A_1$  a  $A_2$  viz tab. 3. Program při každé změně parametrů spustí funkci, která načte hodnotu těchto členů, ty poté vstupují do hlavní funkce, kde jsou z nich vypočítány podle vzorců data pro vykreslování grafu.



**Obr. 9:** Záložka - Termoelektrické napětí

## 2.2.6 Záložky s teoretickým úvodem



Obr. 10: Příklad záložky s teoretickým úvodem do problematiky komplexní permitivity

Záložky "Komplexní permitivita - teorie", "Teplotní roztažnost - teorie", "Teplotní závislost rezistivity - teorie" a "Termoelektrické napětí - teorie" obsahují několik komponentů *Label*, do kterých je umístěn text, seznamující uživatele se základními informacemi o vybrané problematice. Pro vyobrazení vzorců jsou použity komponenty *PictureBox*.

## 2.2.7 Záložka - Konstanty

Tato záložka je dále rozdělena na 3 podzáložky "Teplotní roztažnost", "Teplotní závislost rezistivity" a "Termoelektrické napětí". V těchto podzáložkách jsou pomocí komponentu *PictureBox* vloženy tabulky tab. 1, tab. 2 a tab. 3.

MODULÁRNÍ INTERAKTIVNÍ SIMULACE MATERIÁLOVÝCH VELIČIN		
<div> <div>Úvod</div> <div>Komplexní permitivita</div> <div>Komplexní permitivita-teorie</div> <div>Teplotní roztažnost</div> <div>Teplotní roztažnost-teorie</div> <div>Teplotní závislost rezistivity</div> <div>Teplotní závislost rezistivity-teorie</div> <div>Termoelektrické napětí</div> <div>Termoelektrické napětí-teorie</div> <div>Konstanty</div> </div> <div> <div>Teplotní roztažnost</div> <div>Teplotní závislost rezistivity</div> <div>Termoelektrické napětí</div> </div>		
Materiál	Teplotní součinitel rezistivity $\alpha$ [K <sup>-1</sup> ]	Rezistivita $\rho_0$ při 20°C [μΩ.cm]
Hliník	0,00380	2,650
Měď	0,00429	1,724
Zlato	0,00390	2,240
Stříbro	0,00610	1,590
Železo	0,00641	9,710
Konstantan	0,00300	49,000
Wolfram	0,00450	5,650
Platina	0,00393	10,500
Cín	0,00420	11,000
Kanthal A	0,00006	145,000
Manganin	0,00001	48,000
Nichrom	0,00020	108,000
Nikelin	0,00011	40,000

Obr. 11: Záložka - Konstanty, podzáložka teplotní závislost rezistivity

## 2.3 Popis vytváření modulů

Postup při vytváření jednotlivých modulů, vyobrazujících simulace fyzikálních veličin, lze rozdělit do 3 částí na:

1. Rozmístění komponentů
2. Vytvoření funkcí pro zjištění hodnot nových komponentů
3. Modifikování funkcí pro výpočet a vykreslení jednotlivých os grafu a křivky, funkce pro odečet hodnoty z grafu a funkce pro výpis hodnot.

### 2.3.1 Rozmístění komponentů

Ve vývojovém prostředí Microsoft Visual Studio 2008 byl vytvořen program, který je rozdělen pomocí záložek (komponentu *TabControl*) na jednotlivé moduly. V těchto modulech jsou dále použity komponenty *Label* pro výpis textu, sloužící pro informování uživatele o vybraném modulu (záložce). Moduly jsou úhledně rozděleny pomocí *GroupBoxů* sjednocujících související části modulů. V modulech jsou často zadány vstupní veličiny v *NumericUpDown* členech, u kterých lze nastavit jejich maximální a minimální hodnotu. Dále jsou použity *ComboBox* nabídky, například pro výběr z již definovaných parametrů (výběr materiálu). Pro komunikaci s programem slouží *CheckBox* a *RadioButton*, pomocí nich je programu sděleno, zda-li nebo jak má provést část funkce. *Button* tlačítko je možno použít pro vyvolání některé funkce. *PictureBox* komponenty jsou použity pro vyobrazení obrázků.

### 2.3.2 Vytvoření funkcí pro zjištění hodnot komponentů

Pro každý komponent, který ovlivňuje vstupní veličiny nebo chod programu, je vytvořena funkce, po jejímž vyvolání je navržena hodnota těchto komponent, nebo je vyvolána další činnost programu.

#### Funkce pro získání hodnoty *NumericUpDown* komponentu

```
//funkce nacteni numericUpDown3 tau
double get_numericUpDown3(void)
{
    return System::Convert::ToDouble(this->numericUpDown3->Value);
}
```

Tato funkce přečte hodnotu v *NumericUpDown3* členu, ve kterém je zadána hodnota relaxační doby, poté ji konvertuje na datový typ *double* a tuto hodnotu navrácí.

#### Funkce pro získání čísla aktuální vybrané záložky se simulací závislosti

```
//funkce pro zjisteni aktualni hlavni zalozky
int get_tabPageNumber(void)
{
```

```

        if (this->tabControl1->SelectedTab == tabPage2)
            return 2;
        else if (this->tabControl1->SelectedTab == tabPage9)
            return 9;
        else if (this->tabControl1->SelectedTab == tabPage11)
            return 11;
        else if (this->tabControl1->SelectedTab == tabPage13)
            return 13;
        else
            return 0;
    }

```

Tato funkce navrácí číslo záložky, která je programem aktuálně zobrazována (platí pouze pro záložky, ve kterých je graficky vykreslována některá ze závislostí).

### Funkce pro zjištění hodnoty z *ComboBox* komponentu

```

//funkce pro zjistení materialu z comboBox1 roztaznost
double get_comboBox1Value(void)
{
    double a;
    if (this->comboBox1->SelectedItem == "Hliník")
        alpha=23.8;
    else if (this->comboBox1->SelectedItem == "Stříbro")
        alpha=19.7;
    else if (this->comboBox1->SelectedItem == "Železo")
        alpha=12.0;
    else if (this->comboBox1->SelectedItem == "Měď")
        alpha=16.8;
    else if (this->comboBox1->SelectedItem == "Zlato")
        alpha=18.8;
    else if (this->comboBox1->SelectedItem == "Křemík")
        alpha=2.6;
    else if (this->comboBox1->SelectedItem == "Germanium")
        alpha=5.9;
    else if (this->comboBox1->SelectedItem == "GaAs")
        alpha=5.73;
    else if (this->comboBox1->SelectedItem == "Nikl")
        alpha=13.4;
    else
        alfa= 23.8;
    this->label41->Text=System::Convert::ToString(alpha);
    return alpha*0.000001;
}

```

Po vyvolání této funkce je do proměnné *alpha* typu *double* načtena hodnota teplotního součinitele roztažnosti, podle vybraného materiálu z nabídky. Tato hodnota je poté vypsána do komponentu *Label* jako zpětná vazba pro uživatele. V dalším kroku tato funkce hodnotu *alpha* vynásobí číslem 0,000001, z důvodu sjednocení jednotek, a vynásobenou ji navrátí.

### 2.3.3 Modifikace hlavních funkcí

Při jakékoli změně vstupních parametrů je volána funkce *calculation*. V této funkci jsou načteny hodnoty vstupních parametrů. Z těchto parametrů jsou vypočteny hodnoty pro vykreslení. Poté jsou volány funkce *freeSpace* (vykreslí volnou plochu pro graf), *axis* (vypočítá a vykreslí do volné plochy osy a hodnoty os) a *curve* (vykreslí křivku z vypočtených údajů). Pokud je potvrzen *CheckBox* pro odečtení hodnoty z grafu, je volána i funkce *showValue*, která vypíše do grafu vypočtenou hodnotu. V těchto funkcích je často

použit příkaz *switch*, kterým je zdrojový kód větven. Pro všechny moduly je velká část zdrojového kódu stejná a zbylé části specifické pro daný modul jsou rozděleny příkazem *switch*. Pro přidávání dalších modulů je tedy potřeba pouze přidat část kódu do příkazů *switch*.

### Část funkce *calculation*

```
//funkce pro vypocet
void calculation( bool getValue, double hodnotaprooedecteni)
{
    //deklarace promennych
    double inputVariable[5]={0,0,0,0,0}; //mozno doplnit o dalsi vstupni
                                         //promennou
    double maximum,minimum,verticalStep,prumer,maximumX=0;
    double resultArea[GRAPHWIDTHPX],resultArea2[GRAPHWIDTHPX]={0};
    double xValueArea[GRAPHWIDTHPX];
    int i,l,page,subPage;

    page=get_tabPageNumber();
    switch(page)
    {
        case 2:
            inputVariable[0]=get_numericUpDown1(); //epsilon nek.
            inputVariable[1]=get_numericUpDown2(); //epsilon s
            inputVariable[2]=get_numericUpDown3(); //tauu
            break;
        case 9:
            inputVariable[0]=get_numericUpDown5(); //lo pocatecni
                                                    //delka
            if (this->radioButton1->Checked==true)
                inputVariable[1]=get_numericUpDown6(); //alfa
                                                         //zadana
            else if (this->radioButton2->Checked==true)
                inputVariable[1]=get_comboBox1Value(); //alfa
                                                         //ze seznamu
            else inputVariable[1]=get_numericUpDown6();
            if (get_checkBox3()==1)
            {
                if (this->radioButton4->Checked==true)
                    inputVariable[2]=get_numericUpDown9(); //alfa zadana
                else if (this->radioButton3->Checked==true)
                    inputVariable[2]=get_comboBox2Value(); //alfa ze
                                                             //seznamu
                else inputVariable[2]=get_numericUpDown9();
            }
            get_comboBox1Value();
            get_comboBox2Value();
            break;
        case 11:
            inputVariable[0]=get_comboBox4Value(1); //ro0 1.
                                                         //pocatecni delka
            inputVariable[1]=get_comboBox4Value(0); //alfa 1. ze
                                                         //seznamu
            if (get_checkBox4()==1)
            {
                inputVariable[2]=get_comboBox3Value(1); //ro0 2.
                                                         //pocatecni delka
                inputVariable[3]=get_comboBox3Value(0); //alfa 2. ze
                                                         //seznamu
            }
            get_comboBox3Value(0);
            break;
        case 13:
            inputVariable[0]=get_comboBox6Value(0); //A1 1
```

```

        inputVariable[1]=get_comboBox6Value(1); //A2 1
        if (get_checkBox7()==1)
        {
            inputVariable[2]=get_comboBox5Value(0); //A1 2
            inputVariable[3]=get_comboBox5Value(1); //A2 2
        }
        get_comboBox5Value(0);
        break;
    case 0: break;
}

```

V této funkci jsou nejdříve deklarovány všechny proměnné, které se v této funkci objevují. Poté je volána funkce *get\_tabPageNumber* a navracená hodnota této funkce je uložena do proměnné *page*, jelikož je tato hodnota použita i dále ve zdrojovém kódu. Dalším příkazem je příkaz *switch*, který podle hodnoty proměnné *page* rozhodne, jaké operace budou za příkazem *case* s hodnotou *page* vykonány. Pokud tedy zjištěná hodnota *page* je rovna 2 (odpovídá modulu *komplexní permitivita*), bude do vstupní proměnné *inputVariable[0]* uložena navracená hodnota z funkce *get\_numericUpDown1* (funkce pro zjištění hodnoty optické permitivity  $\epsilon_{\infty}$ ), do vstupní proměnné *inputVariable[1]* uložena navracená hodnota z funkce *get\_numericUpDown2* (funkce pro zjištění hodnoty statické permitivity  $\epsilon_s$ ) a do vstupní proměnné *inputVariable[2]* uložena navracená hodnota z funkce *get\_numericUpDown3* (funkce pro zjištění hodnoty relaxační doby  $\tau$ ). Tyto vstupní proměnné jsou použity dále ve funkci *calculation*. Při přidávání a modifikování modulů je potřeba měnit pouze zdrojový kód ve vnitřních částech příkazů *switch* ve funkcích *calculation*, *freeSpace*, *axis*, *curve* a *showValue*.



### 3 Závěr

V práci jsou popsána témata závislosti složek komplexní permitivity na frekvenci střídavého elektrického pole, teplotní roztažnosti tuhých látek, teplotní závislost rezistivity kovů a termoelektrického napětí rozhraní dvou kovů. Součástí práce je program, který slouží pro simulaci, studium a výuku těchto materiálových veličin. Tento program je členěn do několika modulů. První modul obsahuje úvod, který představuje program uživateli, seznamuje jej s autorem a odborným vedoucím práce a také s ústavem pod jehož záštitou byl projekt vytvořen. Další moduly srozumitelně seznamují uživatele se základními teoretickými poznatky k vybraným tématům. Ve zbylých modulech jsou ze vstupních veličin graficky vykresleny fyzikální závislosti popsaných témat. V posledním modulu je vytvořena databáze použitých vybraných materiálových konstant.

Tato práce vytváří základ pro diplomovou práci, ve které by mohl být rozšířen teoretický okruh a také by měly být vytvořeny další moduly simulující fyzikální závislosti v elektrotechnických materiálech. V programu může být vytvořena funkce pro tisk grafu, případně celé obrazovky programu a funkce pro export vypočtených hodnot ze zadaných parametrů do dalších typů souborů.

## 4 Použitá literatura

- [1] BUREŠ, Jiří. *ConVERTER: Měrný odpor*. [online]. [cit. 2013-05-27]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/tabulky/merny-odpor.htm>
- [2] ČVUT. *Termoelektrické jevy* [online]. [cit. 2013-05-16]. Dostupné z: [http://service.felk.cvut.cz/courses/X36PJV/archiv/Jak/\\_phys/f577/start.html](http://service.felk.cvut.cz/courses/X36PJV/archiv/Jak/_phys/f577/start.html)
- [3] FRYBERT, J. *Počítačové modelování průběhů složek komplexní permitivity*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 38 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Frk, Ph.D.
- [4] HAJKO, V., DANIEL-SZABO, J. *Základy fyziky*. Druhé, doplnené vydanie. Bratislava: VEDA, 1983, 583 s.
- [5] OZEAS. *Termoelektrické jevy* [online]. [cit. 2013-05-16]. Dostupné z: <http://ozeas.sdb.cz/panska/2A/kazi/18%20%20Termoelektrick%E9%20jevy.doc>
- [6] PRATA, S. *Mistrovství v C++*. 3., aktualiz. vyd. Brno: Computer Press, 2007, 1119 s. ISBN 978-80-251-1749-1.
- [7] REICHL, J., VŠETIČKA, M. *Encyklopedie fyziky* [online]. [cit. 2013-05-16]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/>
- [8] ROZSÍVALOVÁ, Z., KŘIVÁK, P., VANĚK, J. *Materiály a technická dokumentace: Laboratorní cvičení*. 2004, 83 s.
- [9] ŠELIGA, L. *Diagnostika vlastností polovodičových materiálů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 45 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Frk, Ph.D.
- [10] UETE. *Simulace UETE: Termoelektrické napětí kovů* [online]. [cit. 2013-05-16]. Dostupné z: <http://laboratorechart.ute.feec.vutbr.cz/termoelektricke-napeti-kovu>
- [11] UETE. *Simulace UETE: Závislost rezistivity kovů na teplotě* [online]. [cit. 2013-05-16]. Dostupné z: <http://laboratorechart.ute.feec.vutbr.cz/zavislost-rezistivity-kovu-na-teplote>
- [12] VAN VLACK, Lawrence H. *Elements of Materials Science and Engineering*. Fourth edition. Massachusetts U.S.A.: Addison-Wesley publishing company, 1980, 558 s. ISBN 0-201-08081-8.